

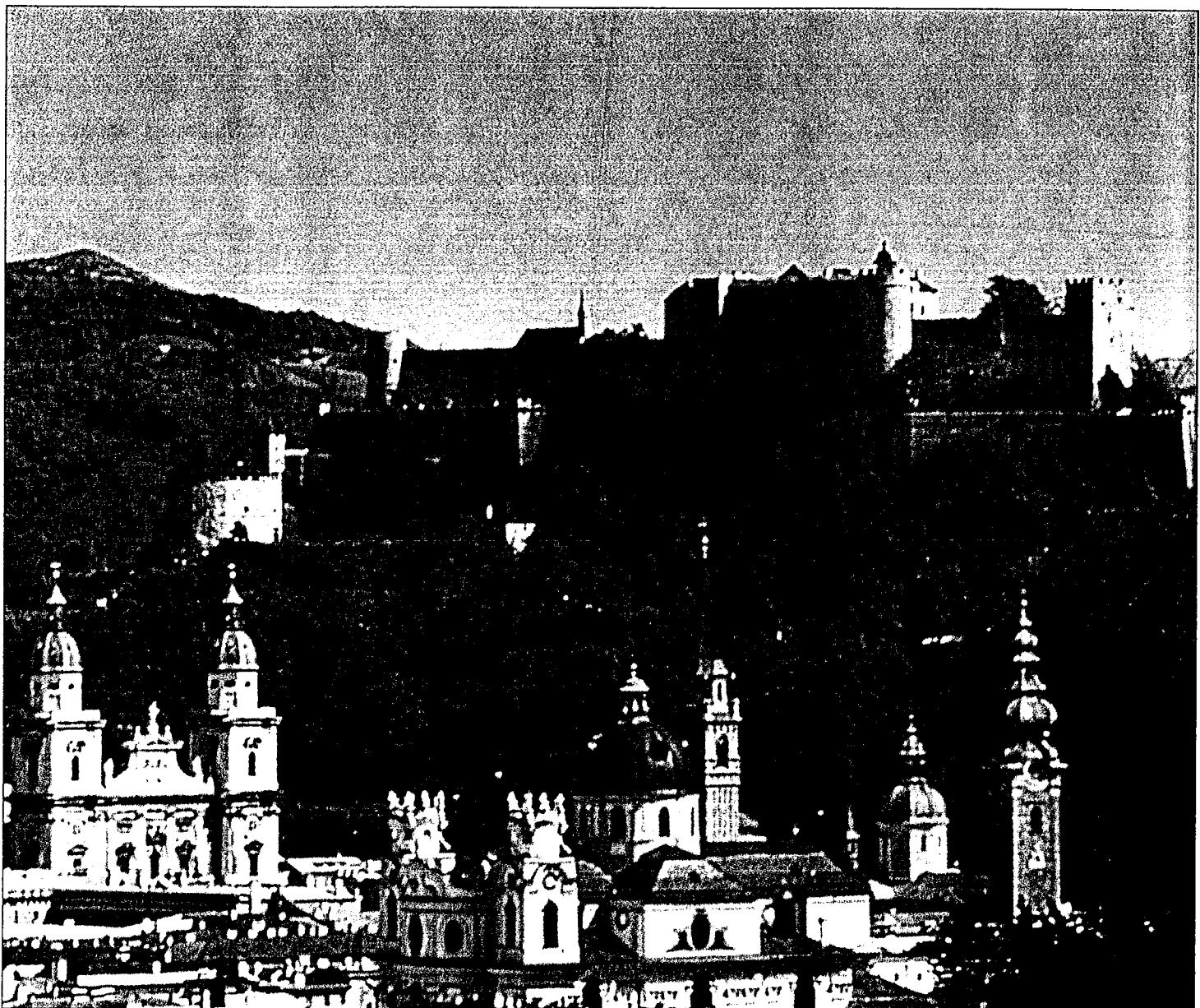
Welt bau

Grundbau Baubetrieb

6/94

DEZEMBER

Fachzeitschrift für Ingenieurgeologie, Geomechanik, Projektierung und Bauausführung



**Die Vorträge des 43. Geomechanik-Kolloquiums
»Franz-Pacher-Kolloquium«
am 13. und 14. Oktober 1994 in Salzburg**

Hydrogeologische Aspekte von Tunnelprojekten

Von Dr.-Ing. Dr. h.c. Giovanni Lombardi

Wasser im Gebirge hat für den Bau und den Betrieb von Tunnelbauwerken mannigfaltige Folgen. Es sei nur erinnert an:

die Beeinflussung der Festigkeitseigenschaften der Felsmassen, wie Verminderung der Reibungs- und Kohäsionswerte,

die mögliche Auswaschung von Feinmaterialien aus der Füllung der Klüfte und der Störzonen mit entsprechender Auflockerung des umliegenden Felsens und Veränderung seiner mechanischen Eigenschaften,

die Verminderung der effektiven und vor allem der Kontaktspannungen in den Klüften und Diskontinuitätsflächen infolge des vorhandenen Wasserdruckes in denselben,

die Beeinflussung und häufig die Beeinträchtigung der Gleichgewichtsverhältnisse in der Felsmasse, insbesondere durch hohe Strömungsdrücke und Kräfte in der Nähe des Hohlraumes,

die Gefahren und Probleme beim Vortrieb, die sich aus obigen Umständen ergeben,

die Fragen der Entwässerung während der Bauzeit,

die Fragen der Abdichtung des fertigen Bauwerkes auf lange Sicht hin oder der ständigen Wasserableitung während der ganzen Betriebsdauer,

die Beeinflussung der Umwelt, so zum Beispiel die Beeinträchtigung von oberflächennahen Grundwasserspiegel, Quellen oder Wasserflächen, wie etwa Staubecken,

die möglichen großräumigen Setzungen des über dem Tunnel liegenden Terrains mit allfälliger nachteiliger Beeinflussung von bestehenden Bauwerken, und zwar als Folge vom Entzug von großen Wassermengen aus dem Gebirge, sowie

die sich daraus ergebenden zahlreichen Fragen, die einerseits mit der Drainierung oder andererseits mit der Injektion des Gebirges zusammenhängen und dies, um seine Festigkeitseigenschaften zu verbessern und/oder die Druck- und Strömungsverhältnisse des Wassers im günstigen Sinne zu beeinflussen (Lombardi 1994).

Wohlbekannt ist schließlich der Umstand, was den Vortrieb anbetrifft, daß die Wasserverhältnisse häufig eine größere Bedeutung einnehmen können als die Felsverhältnisse selbst.

Es liegt auf der Hand, daß für den heutigen Vortrag aus obiger Liste nur eine sehr beschränkte Auswahl getroffen werden kann. Ich werde also nur von Wasserströmungen im Gebirge sprechen und auf einige Besonderheiten hinweisen, die mit der Durchlässigkeit der Felsmassen im Zusammenhang stehen.

Der Verfasser ist beratender Ingenieur für Talsperren und Untertagebauten, Präsident der Lombardi AG, Locarno-Minusio (Schweiz).

Gebirgsverhältnisse

Uns allen ist bekannt, daß jede der oben erwähnten Fragen je nach Gebirgsart eine ganz verschiedenartige Bedeutung aufweist und entsprechend anders zu behandeln und zu beantworten sein wird. Verhältnisse im Karstgebirge sind zum Beispiel kaum mit jenen in weichen lehmhaltigen Formationen zu vergleichen.

Im folgenden wird man sich alleine auf steife, scheinbar elastische, aber geklüftete und wasserführende Felsmassen beschränken, somit auf solche, bei denen die Klüfte nicht einfach durch die herrschenden Druckspannungen zur Gänze geschlossen werden.

In diesem Zusammenhang mag der umgekehrte Umstand in Erinnerung gerufen werden, daß der Wasserdruck Spaltkräfte erzeugt, die selbst im gesunden Fels zur Bildung von Rissen führen können. Auch in größeren Tiefen, wo die Temperaturschwankungen keine Rolle mehr spielen, ist anzunehmen, daß in besonderen Fällen einzelne Kluftsysteme auf diese Spaltkräfte zurückzuführen sind, was auch erklären könnte, daß sie in bestimmter Tiefe enden (Bild 1).

In Wasserdruckversuchen können bekanntlich bereits vorhandene Klüfte geöffnet und erweitert, aber auch neue erzeugt werden. Es ist daher denkbar, daß in ähnlicher Weise bei Tunnelarbeiten in großer Tiefe Risse in gesundem Fels verursacht werden können, etwa durch eine lokale Erhöhung der Wasserdrücke, aber noch eher infolge der Verminderung der herrschenden Druckspannungen im Fels.

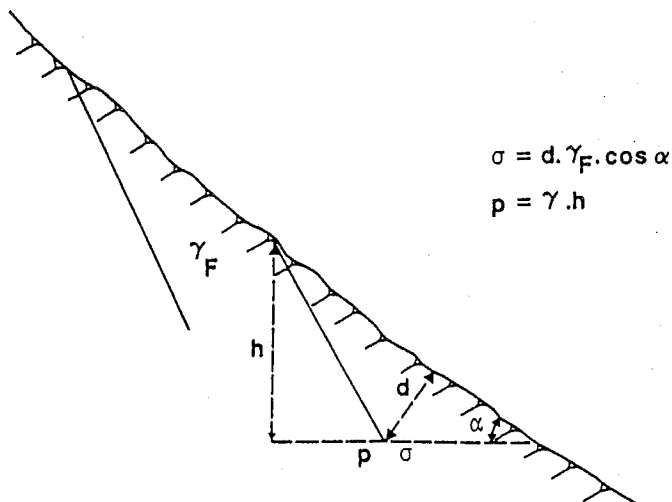


Bild 1 Mögliche Konfiguration für die Bildung von hydraulisch bedingten Spaltrissen. Wasserdruck p = treibende Kraft; Querdurchdringungskraft σ und Zugfestigkeit des Felsens = widerstehende Kräfte.

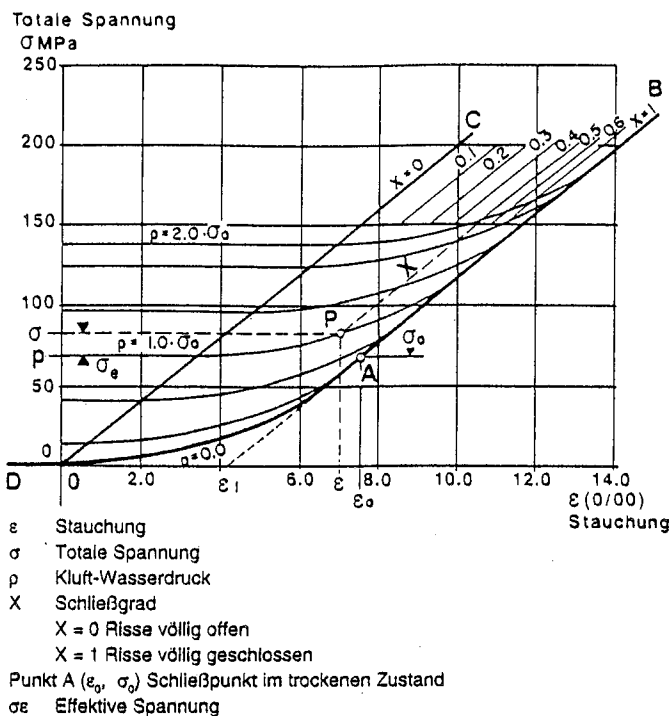


Bild 2 FES-Modell für eine Felsmasse (Beispiel).

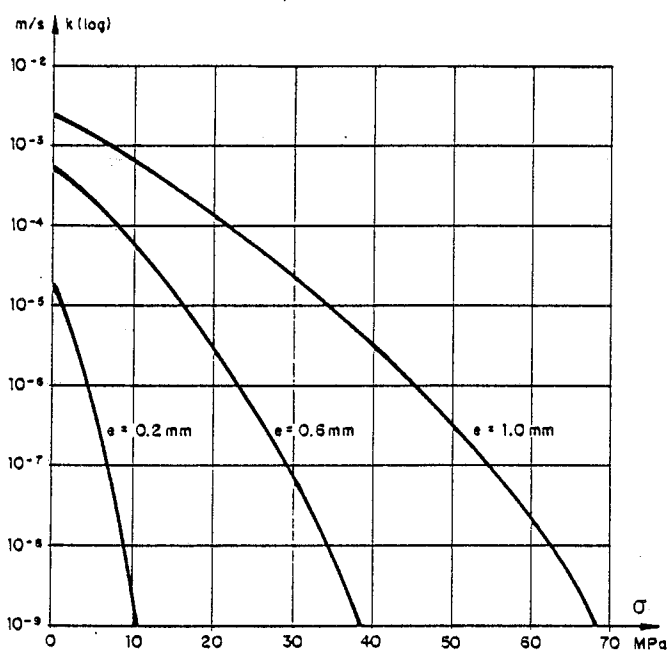


Bild 3 Errechnete Durchlässigkeiten von Felsklüften in Funktion der effektiven Spannung für verschiedene Kluftweiten e (zehn Klüfte pro Meter).

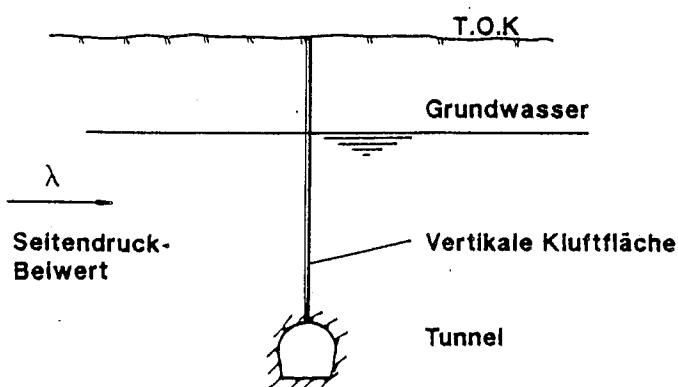


Bild 4 Einfache Konfiguration zur Untersuchung der Fließvorgänge im Gebirge.

Modellierung der geklüfteten Felsmasse

Zur quantitativen Behandlung der hier zur Diskussion stehenden Fragen wird eine geeignete Modellierung der geklüfteten Felsmasse benötigt. Eine solche liefert, neben anderen, etwa das FES-Modell (Fissured, Elastic, Saturated rock mass) (Bild 2) (Lombardi 1992 a).

Bedeutend ist dabei der Umstand, der unbedingt berücksichtigt werden muß, daß die Durchlässigkeit der Klüfte vom Spannungszustand in wesentlichem Maße abhängt, und zwar von der effektiven Spannung, die senkrecht zur Klüftfläche wirkt.

Wie aus dem Bild 3 ersichtlich, kann diese Abhängigkeit äußerst stark sein. Tausend- oder millionenfache Schwankungen sind durchaus möglich (Lombardi 1990, 1992 b). Dabei spielt die „ursprüngliche“, das heißt, die im spannungslosen Zustand vorhandene „Öffnung“ der Kluft selbstverständlich eine ausschlaggebende Rolle. Ebenso hat der vorhandene „natürliche“ Spannungszustand vor dem Bau für die Durchlässigkeit des Gebirges eine große Bedeutung.

Im Tunnelbau sind vertikale Klüfte für den Wasserzufluß in der Regel von größter Bedeutung. Wir werden uns auf diese konzentrieren. Daraus ergibt sich, verständlicherweise, daß die Seitendruckbeiwerte die Verhältnisse in wesentlichem Maße beeinflussen.

Anwendung auf einfache Fälle

Die Durchlässigkeitsverhältnisse und folglich die tatsächlichen Fließbilder im Gebirge sind äußerst komplex, wenn man an die verschiedenen Kluftsysteme und an die komplizierten und veränderlichen Randbedingungen des Problems denkt. Einfache Potentialströmungsberechnungen können nur sehr bedingt ein zuverlässiges Bild der tatsächlichen Zustände liefern. Wenn auch das Problem naturgemäß dreidimensional ist, ist dennoch die Untersuchung von einfachen ein- und zweidimensionalen Fällen vorerst von großem Nutzen, um die wichtigsten Zusammenhänge zu erkennen.

Als Grundfall werde der einfachst mögliche, theoretische, eindimensionale Fall einer vertikalen Kluft konstanter Eigenschaften, in der Tunnelachse gelegen, gemäß Bild 4, betrachtet.

Das Bild 5 zeigt den Einfluß des Seitendruckbeiwertes auf die im Tunnel zufließende Wassermenge, in der Annahme, der Grundwasserspiegel falle mit der Bodenoberfläche zusammen. Dieser Einfluß steigt in beträchtlichem Maße mit der Tiefe: Es ergibt sich zum Beispiel bei einer Tunneltiefe von 1500 m eine Zunahme auf das Sechsfache, wenn der Seitendruckbeiwert von 1,0 auf 0,5 zurückgeht. Bei einer weiteren Reduktion des Wertes unter etwa 0,38 würde ja wegen „hydrofracturing“ eine völlige Entzweispaltung des Gebirges stattfinden, sofern selbstredend genügend Wasser zur Verfügung stünde.

Einen enormen Einfluß auf die Sickermenge hat auch, wie bereits erwähnt, die Weite der Kluft im ungespannten Zustand. Dies wird durch das Bild 6 bestätigt. Mit der Tiefe des Tunnels ergibt sich auf jeden Fall, bei sonst gleicher Klüftigkeit, eine bemerkenswerte Verminderung der Sickerwassermengen.

Beachtlich ist auch, wie unterschiedlich sich die einzelnen Kluftweiten mit der Tiefe des Tunnels verhalten. Aus dem Bild 7 ist das Verhältnis der Sickermengen von zwei verschiedenartigen Kluftsystemen in Funktion der Tiefe

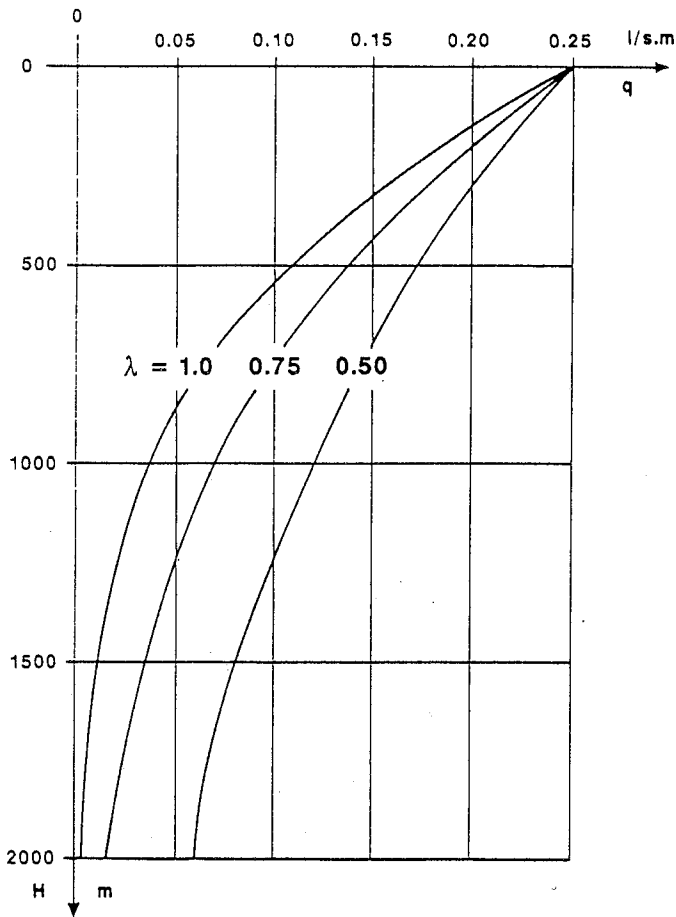


Bild 5 Einfluß des Seitendruckbeiwertes λ und der Tiefe H des Tunnels auf die einsickernde Wassermenge q für den Grundfall gemäß Bild 4 (Klüftweite spannungslos 1.0 mm, Grundwasser auf Bodenhöhe).

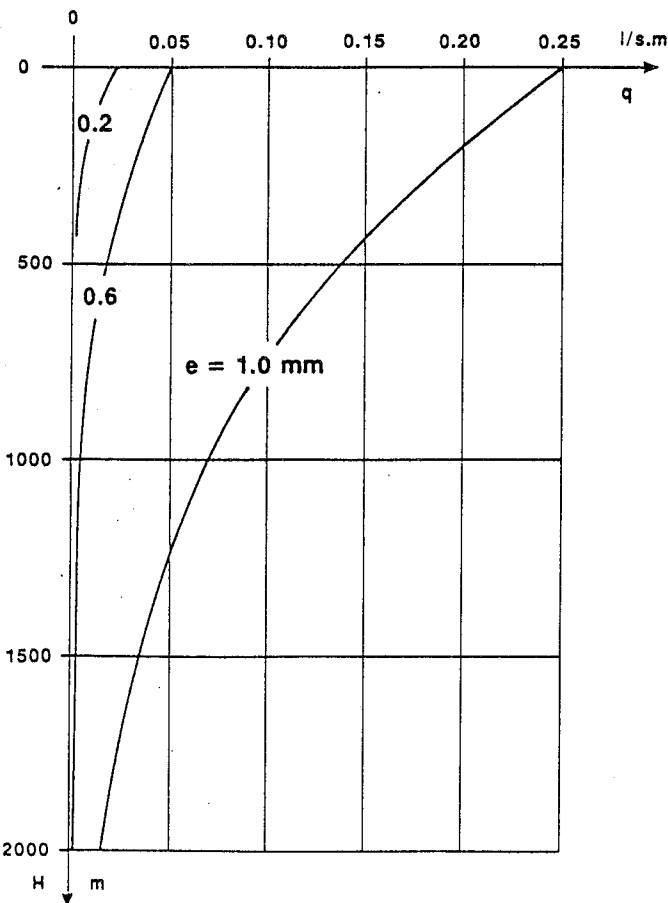


Bild 6 Einfluß der Fugenweite e (spannungslos) und der Tiefe H des Tunnels auf die einsickernde Wassermenge q gemäß Bild 4 (Seitendruckbeiwert 0.75, Grundwasser auf Bodenhöhe).

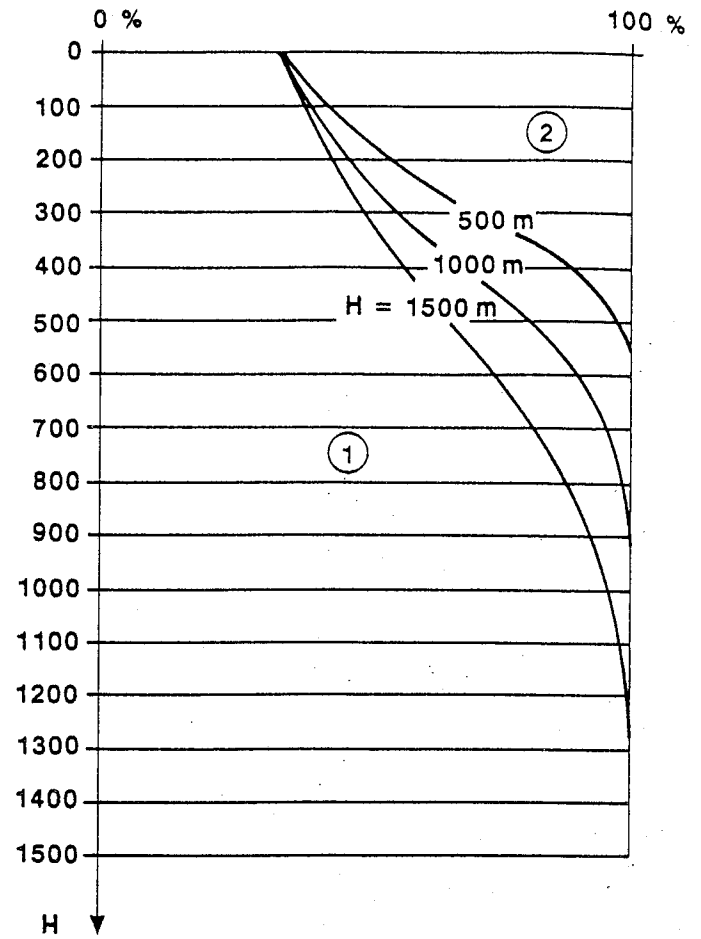


Bild 7 Aufteilung des Wasserzufflusses zwischen 250 Klüften von 0.2 mm Weite (2) und einer Klüft von 1.0 mm Weite (1) für Tunnel mit 500, 1000 und 1500 m Überlagerung.

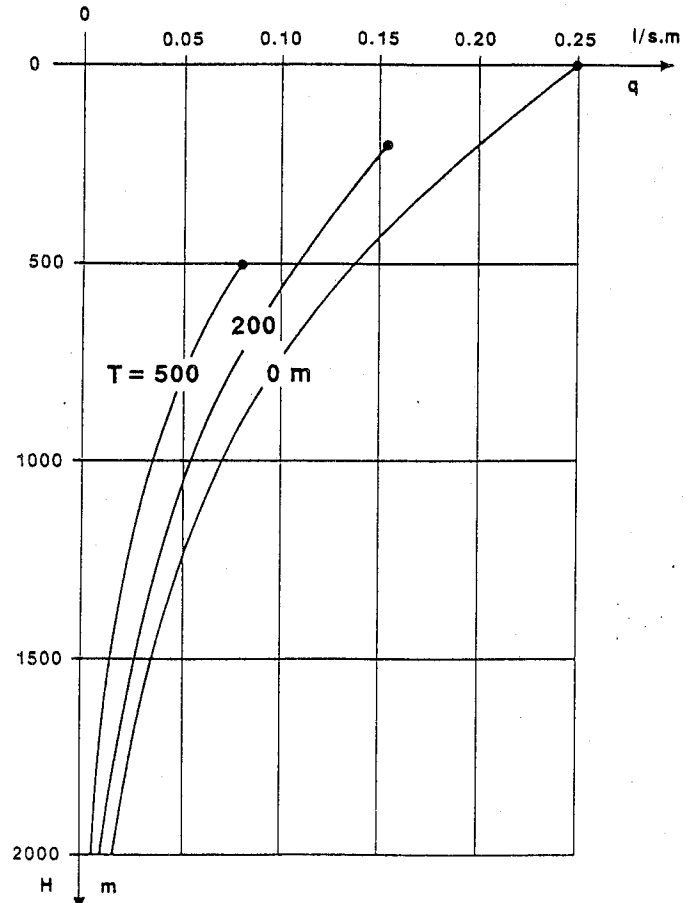


Bild 8 Einfluß der Tiefe T des Grundwasserspiegels und der Tiefe H des Tunnels auf die einsickernde Wassermenge q für den Grundfall gemäß Bild 4 (Seitendruckbeiwert 0.75, Klüftweite [spannungslos] 1.0 mm).

ersichtlich. Eine erste Folge dieses Umstandes ist, daß mit der größeren Tiefe des Tunnels die dünnen Spalten und Klüfte immer weniger Wasser führen und daß sich die Sicker Mengen auf die Hauptklüfte konzentrieren. Diese Tatsache kann in der Praxis beobachtet werden, wenngleich auch andere Faktoren häufig zu einer Verwischung des Bildes führen. Da diese Entwicklung auch im Laufe von geologischen Perioden stattfindet, versteht man, daß sich in der Tiefe die Verwitterung vorwiegend auf die Hauptstörungs zonen konzentriert. Die unvermeidliche Störung des Gebirges durch den Tunnelausbruch führt zu einer neuen Verteilung auf mehrere Klüfte der an sich bereits konzentrierten Wassereinsickerungen.

Eine nicht unbedeutende, wenn auch nicht ausschlaggebende Rolle spielt ferner die Kote des Grundwasserspiegels unter der Terrainoberfläche, wobei selbstredend dieser Einfluß für tiefe Tunnel zum Verschwinden neigt (Bild 8).

Ein weiterer wichtiger Sachverhalt ist die Verteilung des Wasserdruckes entlang der angenommenen vertikalen Kluft, das heißt schließlich im Gebirge. Wiederum spielt die Seitendruckziffer eine klare Rolle, wie aus dem Bild 9 zu ersehen ist.

Auffallend sind die sehr großen Gradienten, die sich in der Nähe des Tunnels einstellen. Sie erreichen Werte von 20 und darüber, wobei große Seitendruckbeiwerte in dieser Beziehung eher ungünstig sind, da sie wohl zu kleineren Sicker Mengen führen, dafür aber große Gradienten und somit größere Strömungskräfte in der Nähe des Hohlraumes erzeugen. Wiederum werden die Verhältnisse rund um den Tunnel durch die dort stattfindenden Spannungsumlagerungen und die entsprechenden Änderungen in den Kluftsystemen beeinflusst.

Diese allenfalls extrem hohen Gradienten und die entsprechenden Strömungsdrücke werden in der Regel in der Bruch- oder plastischen Zone rund um den Tunnel wesentlich abgebaut, und zwar aufgrund der dort aus der Spannungsumlagerung, wegen der Dilatanz der Bruchflächen, sich ergebenden größeren Durchlässigkeiten des Gebirges. Nichtsdestoweniger sollten sie in der felsmechanischen Berechnung des Hohlraumes gebührend Berücksichtigung finden; dies ist anscheinend nicht immer der Fall.

In noch ausgesprochen extremerem Maß führt die unterschiedliche Weite der Kluftflächen zu unterschiedlichen Verläufen der Wasserdrücke, das heißt der jeweiligen Wassersäulen und der entsprechenden Gradienten. Ein Beispiel ist im Bild 10 gezeigt. Dünnere Klüfte führen auf das gleiche Niveau zu größeren Wasserdrücken, wobei selbstverständlich viel kleinere Wassermengen einsickern.

Wie der Fall von Längsklüften könnte auch derjenige von Querklüften zum Tunnel behandelt werden, wobei noch größere Druckgefälle in der Nähe des Tunnels auftreten würden. Ebenso können auch schrittweise kompliziertere Fälle untersucht werden.

Setzungen

Die Änderung des Wasserdruckes in den Klüften ist wohl bekanntlich die Ursache von Spannungsumlagerungen in der Felsmasse und von entsprechenden Verformungen. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Setzungen, die an der Terrainoberfläche verursacht werden können.

Ein nunmehr klassischer, wenn auch außergewöhnlicher Fall ist derjenige der Bogensperre Zeuzier in der Schweiz, der bereits vielfach veröffentlicht worden ist. Es

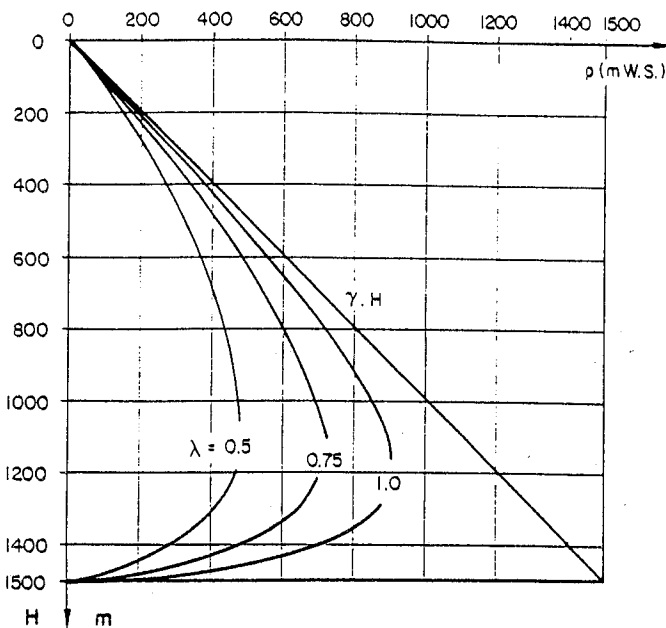


Bild 9 Verlauf des Wasserdruckes (m Wassersäule) im Gebirge für einen 1500 m tiefen Tunnel in Funktion des Seitendruckbeiwertes λ (1 mm weite Kluftfugen, Grundwasser auf Terrainhöhe).

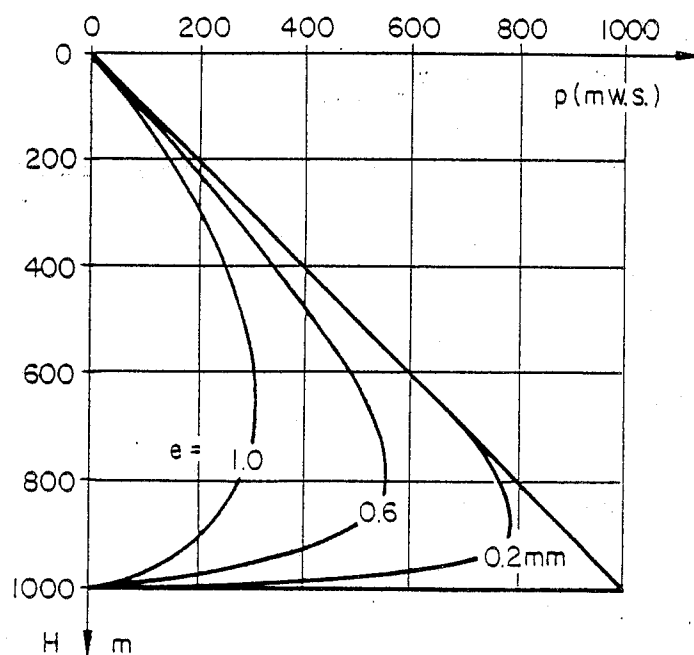
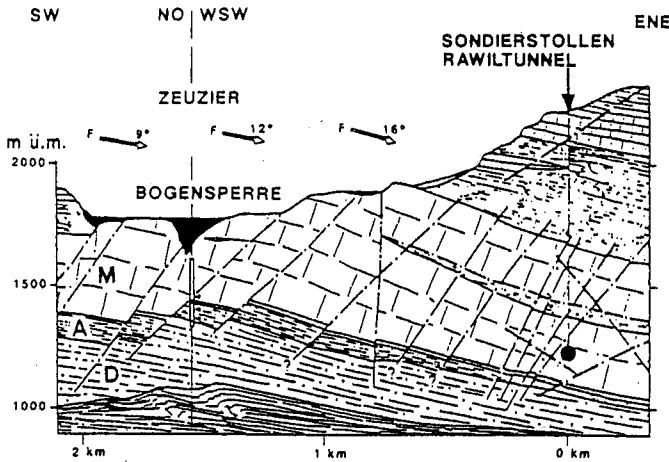


Bild 10 Verlauf des Wasserdruckes (m Wassersäule) im Gebirge für einen 1000 m tiefen Tunnel in Funktion der Kluftweite e (Seitendruckbeiwert = 0.5, Grundwasser auf Terrainhöhe).

darf dabei erinnert werden, daß der Sondierstollen für den Rawil-Straßentunnel einen unter der Sperre liegenden gespannten Wasserträger durch eine Anzahl von Hauptklüften angezapft hat (Bild 11) (Lombardi 1988, Pougatsch 1990).

Dies führte zu einer Entwässerung des Gebirges und zu bedeutenden Setzungen, die 13 cm erreichten, aber auch zu einer Verengung des Tales um etwa 7 cm (Bilder 12 und 13).

Gut bekannt ist auch, daß diese Bogensperre große Schäden erlitten hat, aber auch, daß sie repariert werden konnte und seit nunmehr 6 Jahren ohne jegliche Einschränkung oder Auflage voll in Betrieb steht. Der ganze



M Malm A Alenien D Dogger

Bild 11 Sperre Zeuzier. Geologischer Talquerschnitt mit Sondierstollen Rawil. Mit gespanntem Wasserträger im Dogger, der vom Rawil-Stollen angezapft wurde.

hydromechanische Vorgang konnte damals, in sehr zufriedenstellender Art, rechnerisch nachvollzogen werden, wenn sich auch einzelne Vereinfachungen als nötig erwiesen hatten, in Anbetracht der Erstmaligkeit des Falles und der Dringlichkeit seiner Lösung. Der verwendete Lösungsansatz war einigermaßen auf den Fall Zeuzier maßgeschneidert.

Wenn auch der Unfall Zeuzier, wie bereits gesagt, ein ganz spezieller Fall war, bei welchem eine Anzahl von ungünstigen Umständen eine Rolle mitgespielt haben, sind doch weitere Fälle von Setzungen an der Terrainoberfläche infolge einer durch einen Tunnelbau bedingten Drai-

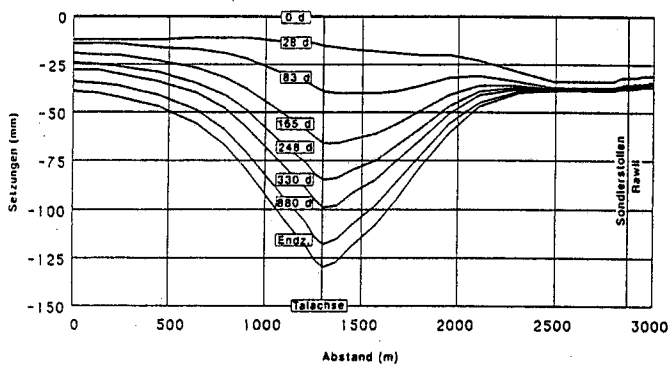


Bild 12 Sperre Zeuzier. Setzungen an der Oberfläche mit räumlicher Verteilung und zeitlichem Ablauf.

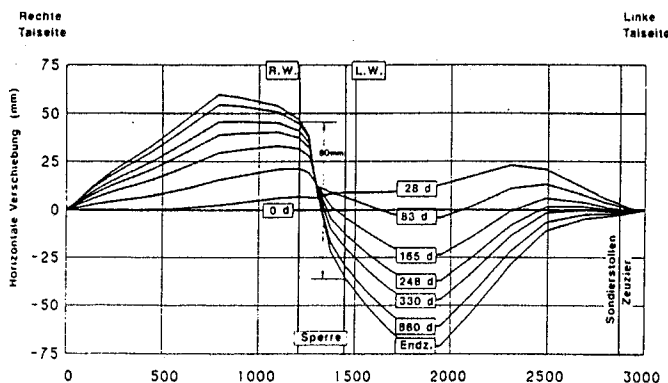


Bild 13 Sperre Zeuzier. Horizontale Verschiebungen mit räumlicher Verteilung und zeitlichem Verlauf.

nierung der Felsmassen bekannt, auch wenn sie keine große nachteilige Folgen zeitigten.

Neue Alpentransversalen

In der Schweiz sollten demnächst zwei neue „Alpentransversalen“, das heißt, die zwei Basiseisenbahnlinien am Gotthard und am Lötschberg in Angriff genommen werden. Hauptbauwerke sind selbstverständlich die sehr langen Basistunnel.

Es trifft sich, daß über diese Tunnel eine Anzahl von Staubecken und entsprechenden Sperren liegen, die durch allfällige drainagebedingte Setzungen theoretisch in Mitleidenschaft gezogen werden könnten. Im Bild 14 ist ihre Lage schematisch gezeigt. Darunter sind fünf Bogensperren zu zählen, welche bekanntlich nicht auf Setzungen an sich, wohl aber auf relative Verschiebungen der beiden Talflanken recht empfindlich sein können.

Aus diesem Grunde sind eingehende Untersuchungen im Gange, sowohl hydrogeologischer als auch felsmechanischer Art. Grundsätzlich sollen die bei Zeuzier gemachten Erfahrungen bestmöglichst ausgewertet werden und die Probleme sinngemäß in einer allgemeineren Art vertieft werden.

Demnach wird ein dreidimensionales Modell aufgestellt, das das mechanische Verhalten des Felsens mit den hydraulischen Vorgängen koppelt. Es basiert auf den Erkenntnissen des erwähnten FES-Modells. Erste Ergebnisse in der Form einer Nachrechnung des Falles Zeuzier liegen vor. Sie zeigen mit einigen kleinen Abweichungen eine sehr zufriedenstellende Übereinstimmung, wobei sich zusätzliche wesentliche Resultate ergeben.

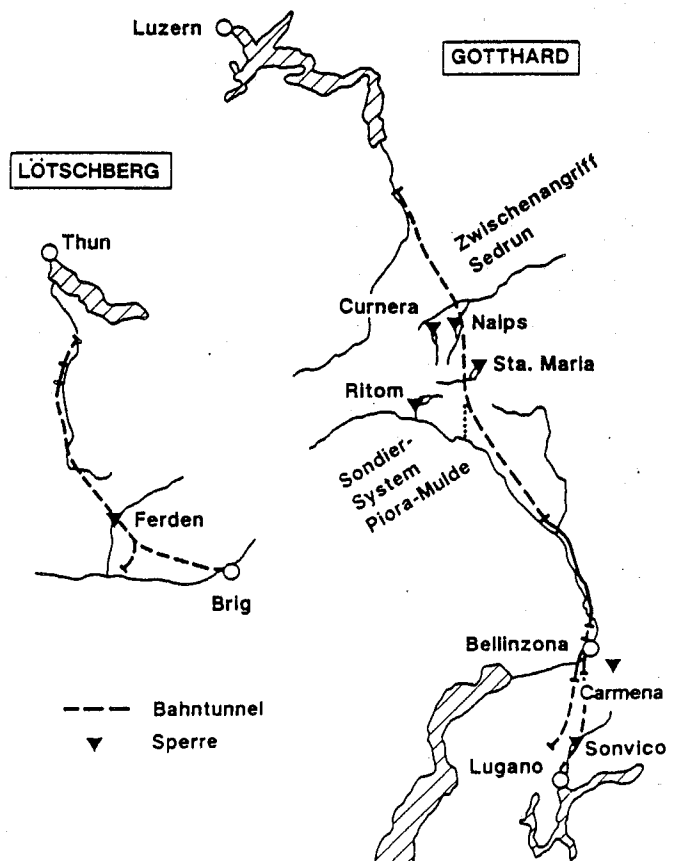


Bild 14 Lagebeziehung der Tunnel der Alptransitlinien Lötschberg und Gotthard und der interessierenden Sperren.

Schlußfolgerungen

Aus den anlässlich von Projekten für Tunnel in großer Tiefe durchgeführten Untersuchungen, angefangen beim Fall Zeuzier, haben sich einige interessante Ergebnisse hydrogeologischer und felsmechanischer Natur herausgestellt. Sie gewinnen an Bedeutung, je größer die Tunnelüberlagerung ist.

Sie weisen generell auf die Tendenz der Wassereinsickerungen hin, sich auf die wichtigsten Diskontinuitäten zu konzentrieren. Ferner zeigen sich sehr große Gradienten in der Nähe des Hohlraumes, die in den felsmechanischen Untersuchungen des Hohlraumes berücksichtigt werden müssen. Große Aufmerksamkeit muß zuletzt auch auf die Drainagewirkung zurückzuführenden Setzungen an der Oberfläche geschenkt werden, falls empfindliche Bauwerke über dem Tunnel vorhanden sind.

Zusammenfassung

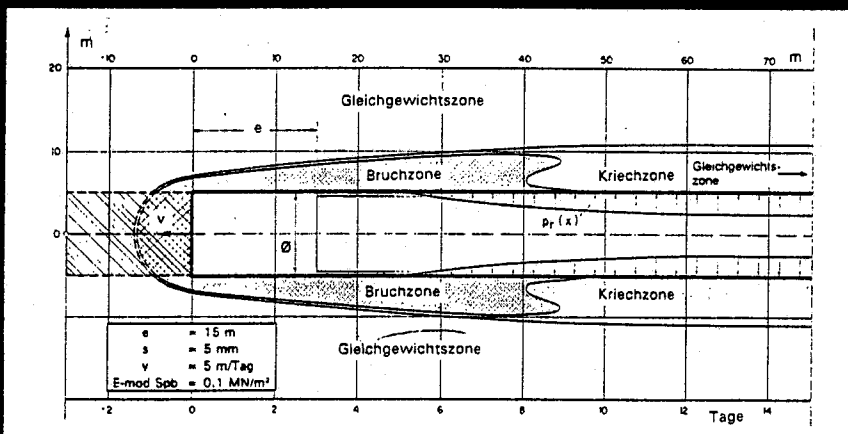
Die im Tunnelbau anzutreffenden Wasserverhältnisse spielen häufig eine größere Rolle als die Felsverhältnisse selbst. Wasser beeinflusst sowohl die Bauausführung als auch den Betrieb von unterirdischen Anlagen. Im vorliegenden Aufsatz wird auf einige spezielle Aspekte im Zusammenhang mit der Durchlässigkeit der Felsmasse hin-

gewiesen, und zwar: selbsttätige Konzentration des Wassers auf die Hauptklüfte, Entstehung von sehr großen Strömungsdrücken in der Nähe des Hohlraumes, sowie mögliche Setzungen an der Terrainoberfläche mit allfälliger Schädigung von bestehenden Bauwerken, wie etwa Tal-sperren.

Quellennachweis

1. Lombardi, G.: *Les tassements exceptionnels au barrage de Zeuzier*. Publication de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches Réunion d'automne, 1988, Berne, N. 118, pp. 39-47.
2. Pougatsch, H.: *Le barrage de Zeuzier - Rétrospective d'un événement particulier*. In: *Wasser, Energie, Luft*, 82 (1990), Nr. 9, pp. 195-208.
3. Lombardi G.: *La perméabilité et l'injectabilité des massifs rocheux fissurés*. In: *Revue Française de Géotechnique*, 51, (1990), pp. 5-29.
4. Lombardi, G.: *The F.E.S. rock mass model - Part 1 and 2*. *Dam Engineering*, Vol. III, Issue 1, February 1992, pp. 49-72, and Issue 3, August 1992, pp. 201-221.
5. Lombardi, G.: *Modèle structural et hydraulique pour roches fissurées, Porous or fractured unsaturated media: transports and behaviour*. Scientific colloquium, October 5-8, 1992, Monte Verità, Centro Stefano Franscini - ETH Zurich, Ascona, Switzerland, Organized by Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne (EPFL) / University of Neuchâtel. Part 2: Flows, Behavior and deformation of variously saturated soils and rock masses, pp. 287-308.
6. Lombardi, G.: *Cimentaciones de presas de hormigón y sus tratamientos*. Symposium internacional de la ISRM - 1994 y IV Congreso sudamericano de mecanica de rocas, Santiago de Chile, mayo 1994.

Projektierung, Beratung und Spezialuntersuchungen im Tunnelbau



LOMBARDI
BERATENDE INGENIEURE

Via R. Simen 19, 6648 MINUSIO
SCHWEIZ
Tel.: + (41 93) 34 60 30
FAX: + (41 93) 33 97 37

- Städtischer Tunnelbau im Lockermaterial (Unterfahrung setzungsempfindlicher Bauwerke, minimale Beeinflussung des Grundwassers, umweltverträgliche Bauweisen)
- Tiefliegende Tunnels in geologisch schwierigen Verhältnissen (grosse Konvergenzverformungen, Gebirgswasser unter sehr hohem Druck, Durchörterung geologisch heikler Störzonen usw.)
- Spezialvortriebe (z. B. Injektionen, Jettingverfahren, Gefrierverfahren, gefräste Schlitzte, Rohrschirme)